

Как видно из (3), в И. р. плазмы в зависимости от её плотности будет преобладать тот или иной тип рекомбинации.

При высокой электронной плотности трёхчастичная безызлучат. рекомбинация [второй член в правой части (3)] преобладает над радиац. рекомбинацией. В этом случае И. р. обусловлено балансом двух взаимно обратных процессов (1). Использование связи между C_{Z-1} и R_Z , вытекающей из принципа детального равновесия (см. *Детальное равновесие принцип*), приводит тогда к известной *Сага формуле*, определяющей n_Z для низкотемпературной плазмы. Однако для высокотемпературной плазмы ($T \geq 10^6$ K), содержащей многозарядные ионы ($Z \geq 10$), этот случай соответствует электронной плотности $n_e > 10^{23}$ см⁻³, превышающей даже плотность твёрдого тела. Обычно же плотность высокотемпературной плазмы на несколько порядков меньше и в ней реализуется противоположная ситуация: преобладают процессы радиац. рекомбинации (при $n_e \approx 10^{21}$ см⁻³ и ниже), а второй член правой части (3) становится несущественным. Действительно, в случае «обычных» плотностей плазмы вероятность столкновения трёх частиц намного меньше, чем двух, а в случае низких плотностей трёхчастичная рекомбинация — редкое событие и И. р. определяется балансом ударной ионизации и двухчастичной рекомбинации. Это хорошо реализуется в условиях солнечной короны ($n_e \sim 10^{14}$ см⁻³), поэтому такое И. р. получило назв. коронального предела. Обозначив

$$p_Z = \frac{C_Z}{\alpha_Z}, \quad q_Z = \frac{n_Z}{\sum_j n_j}, \quad (4)$$

получим из (3) в случае коронального предела выражение для относит. концентраций ионов:

$$q_Z = \frac{\prod_{j=0}^Z p_j}{\sum_j \prod_{k=0}^{j-1} p_k}, \quad p_0 = 1. \quad (5)$$

Относит. концентрация ионов не зависит (в явном виде) от плотности электронов. Пример расчёта И. р. для ионов кислорода в этом случае дан на рис. 1. Каждая

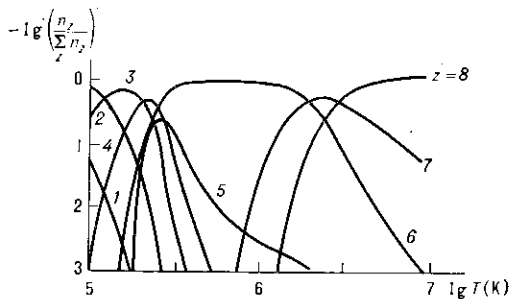


Рис. 1. Относительные концентрации ионов кислорода с различным зарядом ($z=1-8$) в зависимости от температуры при малых значениях плотности электронов (корональный предел).

кривая относит. концентрации при $Z > 1$ сначала растёт с ростом темп-ры за счёт ионизации ионов с $Z' < Z$, а затем убывает при дальнейшем росте T за счёт ионизации ионов более высокой кратности.

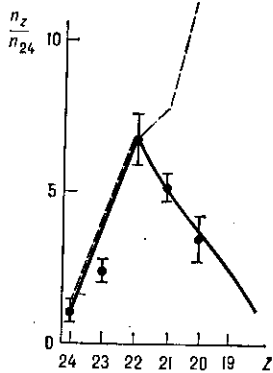
При плотности $n_e > 10^{24}$ см⁻³ также можно использовать результат (5). при этом, однако, относит. концентрации ионов уже имеют определ. зависимость от плотности электронов. Она вызвана столкновениями электронов с рекомбинирующими ионами в процессе диэлектронной рекомбинации, что приводит к появлению зависимости величины α_Z от n_e в (4), т. е. к отклонению от чисто коронального предела. На рис. 2 сопоставлены эксперим. и теоретич. результаты для относит. концент-

раций ионов железа, образующихся в плазме ($T_e \sim 1.3 \cdot 10^6$ K) при фокусировке лазерного излучения на поверхность твёрдого тела [2]. Точки — эксперим. данные. Пулктирная кривая — расчёт в пренебрежении зависимостью скоростей диэлектронной рекомбинации от плотности электронов. Сплошная кривая вычислена с учётом зависимости скоростей диэлектронной рекомбинации от плотности электронов при $n_e = 10^{20}$ см⁻³.

Приведённые результаты относятся к пространственно однородной плазме. При отклонении от однородности в И. р. необходимо учитывать ряд дополнительных факторов. К ним относятся: граничные эффекты, температурная неоднородность плазмы, наличие кластерных ионов; в плазме с магн. удержанием — явление диффузии. Сдвиг И. р. может осуществляться и за счёт хим. неоднородности низкотемпературной плазмы. Во всех перечисл. случаях приведённые выше результаты могут применяться в качестве нач. приближения при анализе кинетики плазмы.

Лит.: 1) Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Статистическая физика, 3 изд., ч. 1, М., 1976; 2) Veigman I. L. и др., On the ionization equilibrium in high temperature plasmas, J. Phys. Ser., 1981, v. 23, p. 236. Л. П. Пресняков.

Рис. 2. Относительная концентрация ионов железа в лазерной плазме.



ИОНИЗАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ — области с повышенной концентрацией заряд. частиц, обычно отделённые от слабо ионизованной или неионизованной среды узкой поверхностью раздела — фронтом волны. Фронт И. в. представляет собой переходную область, в пределах к-рой происходит резкий скачок концентрации заряд. частиц. Структура волны определяется процессами ионизации и переноса частиц и энергии. И. в. могут быть как единичными, так и периодическими (т. н. *страты*), стационарными и движущимися. И. в. наблюдаются в газе, жидкости и твёрдом теле. При электрич. пробое жидкости обычно происходит сначала превращение её в газ, а затем по нему распространяется волна ионизации.

Характерная особенность И. в. заключается в том, что их возникновение и распространение связаны не с перемещением вещества (как это имеет место в уругрих волнах), а с усреднением области интенсивной ионизации. Так, напр., локальное возмущение плотности ионов или электронов в плазме ведёт к возникновению *пространственного заряда* и появлению локального электрич. поля, меняющего, в свою очередь, ср. энергию электронов. В связи с этим меняется скорость ионизации и, соответственно, концентрация заряд. частиц. Вся эта цепь процессов ведёт к распространению возмущения, причём возможно чередование положит. и отрицат. отклонений объёмной плотности электронов и др. параметров плазмы от однородного состояния.

И. в. по характеру физ. явлений в переходной области и механизму перемещения во мн. случаях близки к волнам горения и детонации в газовой динамике и отличаются от них механизмом подвода необходимой для ионизации энергии. В волнах горения и детонации источником энергии является энергия хим. реакции, идущая в основном на нагрев и разгон (в волне детонации) газа. В И. в. энергия подводится извне и затем тратится на нагрев и ионизацию газа, а разгона среды обычно не происходит.

Способы подвода энергии очень разнообразны: напр. непосредственное ускорение электронов внеш. электрич. полем до энергий, достаточных для ударной ионизации, лазерное или др. ионизирующее излучение и т. п. Различны и механизмы перемещения фронта ионизации: дрейф в электрич. поле, теплопроводность (электронная